

京都大学	博士 (情報学)	氏名	森安 竜大
論文題目	Methods for Machine Learning Assisted Reliable Control Design (機械学習を用いた制御設計と信頼性保証)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>近年の機械学習, 特に深層学習の技術の進展に伴い, 学習的なモデリング手法をモデルベース制御に応用する研究に期待が集まっている. 機械学習ではデータのみから対象を高精度に表現する数理モデルを構成できる点から, 特に複雑な実システムを扱う産業界において注目されている. しかし, 深層学習などの手法を実システムの制御に応用した事例はまだ少ない. また, 機械学習モデルの入出力関係の複雑性から, 実応用上は構築したシステムの信頼性保証が重要となる.</p> <p>本論文の目的は, ①機械学習モデルを用いた制御設計を実システムに適用し, その有効性を実験的に検証すること, および②機械学習を用いた制御システムの信頼性を確保する手法を提案することである. 論文中を通じて, 複雑な実システムの代表としてエンジンシステムを選択し, 論文中で提案する各種の手法は同システムに対して適用することで検証を行う.</p> <p>本論文は以下の7章から構成される.</p> <p>第1章では, 上記の課題およびエンジンシステムを概観し, 本研究の貢献を説明している.</p> <p>第2章では, 制御対象の機械学習によるモデリングを実施し, そのモデルを利用したモデル予測制御 (MPC) の制御則を深層学習によって近似する形で制御器を構築した. 制御対象のモデリングに機械学習を利用する例は多くみられるが, MPCの制御則の近似に機械学習を用いる例は比較的少なく, 特に実システムを用いた実験によって有効性を検証している例は極めて少ない. MPCの制御則は非常に複雑であり, 単純な構造の学習器では良好な近似は困難であったが, 本論文においては深層学習を適用することで良好な近似に成功し, 加えて, 実機エンジンを用いた制御実験により, 各種の制約を考慮した上で良好な制御性能を実現可能なことを確認した.</p> <p>第3章では, モデルの信頼性について, 学習対象の持つ動的特性を学習後のモデルが保存するとは限らないという問題への対応として, 対象の動的特性に対する先見知識が存在する場合, その特性をモデルが保持することを保証する手法を構築した. 具体的には, ダイナミクスにおける状態軌道の位相幾何学的構造が既知である簡易モデルの軌道を同相写像ニューラルネットワーク (NN) で変換する構造の動的学習モデルを提案し, 数値例を通して, 学習後のモデルの大域漸近安定性や安定なリミットサイクルの存在などを保証可能であることを確認した.</p> <p>第4章では, 制御器の信頼性について, 学習的に獲得されたモデルを用いた最適制御問題は多くの場合非凸問題となり, 数値的に得られる解の非一意性や, パラメタに対する不連続性が生じることへの対処を検討した. 具体的には, 線形ダイナミクスを全単射なNNで挟むことで非線形な入出力関係を表現し, かつ内部の線形ダイナミクスの入出力信号から凸性を保証したNNを通して追加の出力を得るモデル構造を提案した. これを用いることで, 非線形ダイナミクスに対する入力上下限, 出力上限付きの目標追従問題を線形ダイナミクスに対する凸な最適制御問題に帰着させることが可能となり, 結果として解の一意性や連続性の保証が可能となることを確認した.</p> <p>第5章では, 前章で提案したモデルを拡張することにより, 精度改善が見込めることを示すとともに, 派生する課題の解決策も提示している.</p> <p>第6章では, 制御システムの課題について, MPCの高速な計算と, サンプル値実装した際の閉ループ安定性を両立する手法を提案した. 凸最適化問題に対するPrimal-Dual Gradient Dynamicsと呼ばれる動的システムを用いたMPC制御器を採用し, 適切</p>			

なステップサイズ決定則を導入することで、サンプル値実装した際の閉ループ安定性を保証することに成功した。

第7章では、本論文で得られた結果を要約し、今後の課題について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、モデルベース制御設計に必要なモデルを機械学習によって構築することを前提とし、学習されたモデル、およびそれを用いて設計された制御器、制御システムの信頼性を担保する各種手法を提案するものである。機械学習手法は、第一原理的な取り扱いが困難な複雑系であってもデータのみから数式モデルを構築できるという点で、特に産業界からの期待が大きい一方で、その入出力関係の複雑性ゆえに、実応用上は多様な条件でシステムが正常に動作することを保証することが難しい。この問題に対し、本論文では保証すべき性質をモデル、制御器、制御システムの性質に類別した上で、以下の研究成果を示している。

(1) 学習モデルの問題として、学習対象の持つ動的特性を学習後のモデルが保存するとは限らない点が挙げられる。これに対して、本研究では状態軌道の位相幾何学的構造が既知である簡易モデルの軌道を同相写像ニューラルネットワーク (NN) で変換する構造の動的学習モデルを提案し、学習後のモデルの大域漸近安定性や安定なリミットサイクルの存在などを保証可能とした。

(2) 制御器の問題として、学習モデルを用いてモデル予測制御器 (MPC) を設計する際、各時刻で解くべき最適制御問題が多くの場合非凸問題となり、解の非一意性や、パラメタに対する不連続性が生じることが挙げられる。これに対し、線形ダイナミクスを全単射なNNで挟むことで非線形な入出力関係を表現し、かつ内部の線形ダイナミクスの入出力信号から凸性を保証したNNを通して追加の出力を得るモデル構造を提案している。このモデルを用いることで、非線形ダイナミクスに対する入力上下限、出力上限付きの目標追従問題を線形ダイナミクスに対する凸な最適制御問題に帰着させ、解の一意性や連続性を保証することを可能にした。

(3) 制御システムの問題として、MPCの高速な計算と、サンプル値実装した際の閉ループ安定性を両立することが困難であることが挙げられる。凸最適化問題の解に状態の時間発展が収束するPrimal-Dual Gradient Dynamicsと呼ばれる動的システムが知られるが、本論文ではそれをMPCに応用し、直接最適制御問題を解くのではなく、各時刻でその問題の解に近づくように入力を更新する動的制御器を構築することで高速な演算を実現している。また、離散時間における同制御器の時間発展に対する適切なステップサイズ決定則を導入することで、サンプル値実装した際の閉ループ安定性を保証することにも成功している。

以上、本論文では、機械学習モデルを制御システム設計に応用することを前提に、信頼性の観点からモデル、制御器、制御システムに要求される性質を保証する各種手法を提案しており、その成果は学術の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (情報学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当面の間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。